

חשיבות המגוון הגנטי בהבטחת המשכיות שירותי המערכת של עצי היער בישראל

רקפת דוד-שורץ*¹ | נטשה קינג^{2,1}

- 1 המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי – מכון וולקני
 - 2 הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים
- * rakefetd@volcani.agri.gov.il

תקציר

במרחב, כדי להבטיח את עתיד היערות. ניטור רציף של המדדים הללו חיוני לזיהוי אוכלוסיות בסיכון ולהקמת רשת של יחידות שימור גנטי באתר (*in situ*) המגובות בשימור מחוץ לאתר (*ex situ*). לסיכום, הבטחת שירותי המערכת האקולוגית לדורות הבאים תלויה ביכולתנו להפוך את המגוון הגנטי לעוגן אסטרטגי במדיניות הניהול הלאומית, תוך סנכרון עם המגמות המובילות בעולם והכרה בשונות הגנטית כפוליסת הביטוח של הטבע אל מול עתיד לא יציב.

המגוון הגנטי בעצי היער הוא תשתית בלתי נפרדת מחוסנן של המערכות האקולוגיות, והוא מאפשר את המשכיות שירותי המערכת האקולוגית שהן מספקות. בעוד שמגוון המינים מגדיר את מבנה המערכת, המגוון הגנטי בתוך המינים הוא "ארגז הכלים" האבולוציוני המאפשר להם להסתגל לשינויי אקלים קיצוניים. ללא שונות גנטית מספקת, אוכלוסיות העצים מאבדות את יכולתן להתמודד עם בצורות ומזיקים, דבר המוביל לקריסת שירותי הוויסות, האספקה והתרבות של היער. מאמצים נרחבים לניטור ולשימור גנטי הנעשים במדינות שונות מציבות סטנדרטים מדעיים לניהול יחידות שימור. הצטרפותה של ישראל למאמץ העולמי הזה היא הכרח אסטרטגי, שכן ישראל היא קצה גבול תפוצה עבור מינים רבים. האוכלוסיות המקומיות נושאות מטען גנטי ייחודי להתאמה ליובש, אך הן סובלות מקיטוע ומבידוד המגבירים את הסיכון לשחיקה גנטית. מצב זה מחייב מעבר מניטור טקסונומי פסיבי לניהול אקטיבי ומבוסס מדע. המאמר קורא להטמעת כלים גנומיים מתקדמים, המאפשרים למדוד באופן מדויק את פוטנציאל ההסתגלות

מילות מפתח

אוכלוסיות קצה, סבילות ליובש, שימור גנטי, שינוי האקלים

שירותי המערכת האקולוגית של עצי היער כתלות במגוון המינים

עצי היער מספקים מגוון רחב של שירותי מערכת אקולוגית חיוניים הניתנים לסיווג לשלוש קטגוריות מרכזיות (לוטן ואח', 2019): (1) **שירותי אספקה** – העצים מהווים מקור למשאבים חומריים. הם צוברים ביומסה, משמשים מקור למזון ולמרעה עבור בעלי חיים ודבורי דבש, ומהווים מאגר קריטי של משאבים גנטיים הנחוצים להשבחת מיני תרבות ולשימור המגוון הביולוגי. (2) **שירותי ויסות** – בשל ממדיהם הגדולים יש לעצים תפקיד מכריע בוויסות תהליכים אקולוגיים וביו-גאופיזיים רבים המקיימים את המערכת. נוכחותם ממתנת את קרינת השמש ומשפיעה על משטרי הרוח והלחות, ובכך תורמת לוויסות אקלים מקומי (שפיר ואח', 2018). יתרה מכך, המבנה המורכב של צמרות עצים סמוכות בגבהים משתנים מיעל את הסעת החום מפני הקרקע אל האטמוספירה (Chapin FS III et al., 2011). העצים פועלים כמבלע למזהמים דרך ספיגה אקטיבית בפיוניות (Manes et al., 2012) ודרך שקיעה פסיבית של חלקיקים על פני העלים והגזעים (Singer et al., 1996). מערכות השורשים המסועפות מייצבות את הקרקע מתחת לפני השטח, מונעות סחיפה וממתנות שיטפונות על ידי האטת הנגר העילי והגברת חלחול המים לעומק הקרקע. (3) **שירותי תרבות** – מעבר לתועלת הפיזית, היערות מספקים תועלת שאינה מוחשית. הנוף המיוער מהווה מוקד לחינוך, מחקר, נופש ופנאי, וברמה עמוקה יותר, עצים עתיקים נושאים מטען היסטורי ודתי כ"עצים מקודשים", המהווים סמלי תרבות ומוקדי עלייה לרגל (שפיר ואח', 2018).

איכותם וכמותם של שירותי המערכת האקולוגית שעצי היער מספקים תלויה במידה רבה במגוון מיני העצים. במחקר רחב היקף שבחן 84 מיני עצים, הכוללים רחבי עלים ומחטניים, ושהתבסס על ניתוח של 7,498 חלקות יער טבעיות ברחבי קנדה שנוטרו לאורך תקופה ממוצעת של שלושה עד ארבעה עשורים, נמצא כי מגוון מינים גבוה מעלה את פוריות המערכת (Ding et al., 2024). במחקר אחר, כגון ייצור ביומסה עצית, לכידת פחמן, יבול, פוטנציאל לציד (כשירות תרבות), עושר מינים בתת-היער ונוכחות של עצים מתיים. המחקר בחן את השפעתם של שישה מינים מרכזיים: אשוחית נורווגית (*Picea abies*), אורן היערות (*Pinus sylvestris*), לבנה (*Betula spp.*), אלון אנגלי (*Quercus robur*), צפצפה מצויה (*Populus tremula*) ואשור (*Fagus sylvatica*). הממצאים הראו עלייה ברורה בתפקוד ובשירותי המערכת האקולוגית בעומדים בעלי

חמישה מיני עצים בהשוואה לעומדים חד-מיניים של מין בודד מתוך הרשימה שנבחנה. המחקר הדגיש כי מיני עצים שונים מספקים מגוון תפקודי משלים, ולכן צמצום מגוון המינים עשוי להוביל לירידה תלולה בכלל שירותי המערכת האקולוגית (Gamfeldt et al., 2013). במחקר שנערך בחמישה אתרים לאורך המכל האקלימי בישראל (מהר מירון ועד עבדת), נמצא כי מגוון המינים המעוצים (שיחים ועצים) מכתוב את התפלגות המים והנטריינטים בקרקע. המינים האלה פועלים כ"מווסתי נוף" (Landscape modulators) שיוצרים כתמיות של משאבים, ובכך מחזקים את היציבות התפקודית של המערכת כולה (Shachak et al., 2008). במקרים שתוארו לעיל, נמצא כי יחסי גומלין משלימים בין המינים הם המפתח לניצול יעיל של משאבים ולהגברת העמידות בפני עקות ביוטיות ואביוטיות. הממצאים האלה מחזקים את הטענה כי בניהול יערות בר-קיימא יש לתת דגש למגוון מינים שמגדיל את המגוון התפקודי, שכן השילוב התפקודי הוא שמבטיח את יציבות הפוריות ואת המשכיות שירותי המערכת האקולוגית לאורך זמן (Gamfeldt et al., 2013; Ding et al., 2024).

המגוון הגנטי כמרכיב בסיסי בתפקוד המערכת האקולוגית

מגוון המינים הוא רק רובד אחד ממה שמכונה המגוון הביולוגי, מושג שהתגבש והתפתח בשלהי המאה ה-20, ומתייחס לרב-שכבתיות של עולם החי, החל מהמערכת האקולוגית ככלל, דרך יחסי הגומלין בין המינים, ועד לרובד היסודי ביותר שהוא המגוון הגנטי הקיים בתוך כל מין ומין (Noss, 1990). הגדרה היררכית זו, הכוללת רכיבים גנטיים, טקסונומיים ותפקודיים, הניחה את היסוד להבנה כי חוסן המערכת תלוי במגוון התורשתי המצוי בתוכה. המסגרת המשפטית הבין-לאומית למושג זה נוסדה באמנה בנושא המגוון הביולוגי (Convention on Biological Diversity; CBD) משנת 1992, שהגדירה את המגוון הגנטי בתוך המינים (Diversity within species) כאחד מעמודי התווך של השימור העולמי (Secretariat of the CBD, 2011). בשנת 2022 עודכנה תפיסה זו באמנת קונמינג-מונטריאול (Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework) KMGBF, שהיא העדכון האופרטיבי המשמעותי ביותר לה (Stephens, 2023). מסמך זה מציב יעדים שאפתניים לשנים 2030 ו-2050, תוך מתן דגש מיוחד על שימור המגוון הגנטי ככלי קריטי להבטחת יכולת ההסתגלות של המינים לשינוי האקלים ולמניעת קריסה ביולוגית (Hébert et al., 2025). עם זאת, אל מול הצהרות הכוונות האלה ניצבת מציאות מורכבת: מטא-אנליזה רחבת היקף שפורסמה לאחרונה, והתבססה על אלפי מחקרים שבחנו קשת

על העדפות התזונה של בונים (*Castor canadensis*), הבוחרים באופן סלקטיבי להשתמש בעצים בעלי ריכוז טנינים נמוך למאכל ולבניית סכרים. פעילות סלקטיבית זו לא רק מאפשרת את שגשוגם של הבונים כמין מפתח, אלא משנה את הרכב היער לטובת עצים עתירי טנינים. שינוי זה משפיע בתורו על האינטראקציות של העצים עם חרקים ועל קצב פירוק החומר האורגני בקרקע. כך, הבדלים גנטיים עשויים להכתיב את תפקוד המערכת האקולוגית כולה (Bailey et al., 2004).

חשיבותו של המגוון הגנטי קשורה קשר הדוק לגודל האוכלוסייה האפקטיבית (N_e – Effective Population Size). המושג הזה אינו מתייחס למספר הפרטים בשטח בלבד, אלא למספר הפרטים שתורמים בפועל את המטען הגנטי שלהם לדור הבא, ובכך מבטיחים את שימור השונות הגנטית באוכלוסייה (Frankham et al., 2014). ככל שהאוכלוסייה האפקטיבית גדולה יותר, נמנעת שחיקה גנטית (אובדן מקרי של גרסאות גנטיות), ונשמר פוטנציאל ההסתגלות של המין אל תנאי סביבה משתנים. לעומת זאת, באוכלוסיות קטנות גוברת השפעתה של הסחפיפה הגנטית. במצב זה יש לאירועים מקריים (כמו מוות של פרט טרם התרבותו) השפעה דרמטית על מאגר הגנים של הדור הבא, והדבר מוביל לצמצום המגוון הגנטי. עבור מנהלי השטח, המגוון הגנטי אינו עוד מושג תאורטי, אלא נכס מדיד ובר-כימות. השמירה עליו נתפסת כיום כחובה מקצועית וערכית, המהווה את "תעודת הביטוח" של המערכת האקולוגית אל מול פני העתיד.

מידת המגוון הגנטי

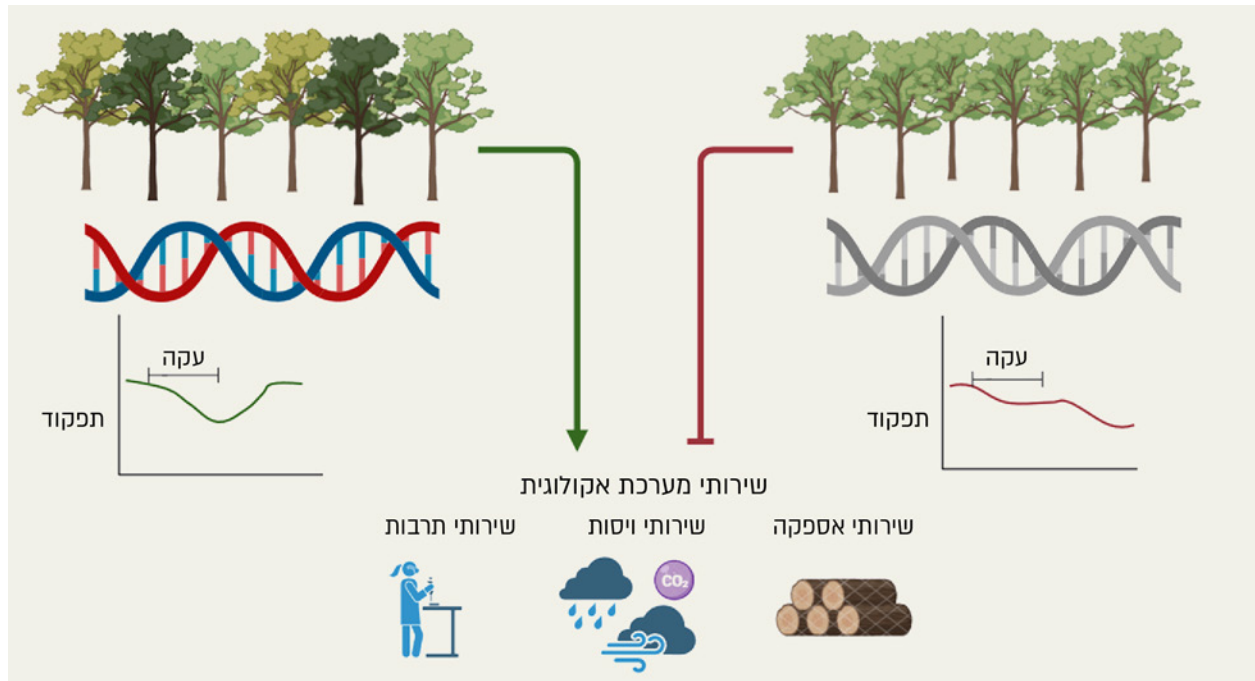
הערכת המגוון הגנטי של מין מסוים נשענת על זיהוי הבדלים ב-DNA בין פרטים שונים. הניסיונות הראשונים לאפיין את המגוון הגנטי התבססו על בחינת שונות בחלבונים (איזוזימים), אך היא סיפקה תמונה חלקית בלבד. עם התפתחות הביולוגיה המולקולרית עבר המוקד לשימוש בסמני DNA, שהם מעין סימני דרך לאורך הגנום. תחילה התבסס המחקר המולקולרי על סמני DNA מהדור הישן, כגון AFLP ו-RAPD, שאפשרו אומנם לסרוק את הגנום כולו ולזהות מספר רב של אתרים המעידים על שונות גנטית, אך פעלו בשיטה דומיננטית של "נוכחות או היעדרות" בלבד, כך שלא ניתן לקבוע אם התכונה הורשה משני ההורים או רק מאחד מהם. לכך נוספו מגבלות טכניות, כגון מורכבות הביצוע הגבוהה של AFLP והקושי בקבלת תוצאות הדירות בשיטת RAPD. כיום המעבר לשימוש בטכנולוגיות ריצוף מהיר (Next Generation Sequencing – NGS) מוביל לשימוש בסמנים קו-דומיננטיים מתוחכמים יותר, דוגמת SNP ו-SSR, המאפשרים "לראות" את שתי הגרסאות של

רחבה של אורגניזמים, חושפת מגמת הצטמצמות מדאגיה של המגוון הגנטי בתוך אוכלוסיות ברחבי העולם. ממצאי המחקר מלמדים כי לא תמיד קיים מתאם חיובי בין עושר המינים למגוון הגנטי שלהם; ייתכנו מקרים של עושר מינים גבוה באתר מסוים, בעוד שהאוכלוסיות שמרכיבות אותו סובלות מדלדול גנטי המערער את חוסן התורשתי (Shaw et al., 2025). הנתונים האלה מחזקים את הטענה כי לצורך הבטחת יציבות אקולוגית לא ניתן להסתמך באופן בלעדי על מדדים טקסונומיים של עושר מינים. הממצאים מדגישים כי נסיגה זו, שהתרחשה בארבעת העשורים האחרונים כתוצאה ישירה של לחצי פעילות אנושית, אינה פוסחת גם על אוכלוסיות שאינן מוגדרות בסכנת הכחדה חמורה. מדובר בתופעה עולמית רחבת היקף, המערערת את יכולת ההתאוששות של מערכות אקולוגיות רבות, ומחייבת מעבר דחוף מהצהרות מדיניות לפעולות שימור אקטיביות ומבוססות נתונים בשטח (Shaw et al., 2025).

המגוון הגנטי הוא למעשה "חומר הגלם" של החיים. ההבדלים הקטנים ברצפי ה-DNA הופכים כל פרט וכל קבוצה בתוך המין לייחודיים, ומציידים אותם בארגז כלים חיוני להישרדות (Da Silva et al., 2026). ניתן לדמות זאת לארגז כלים של בעל מקצוע: ככל שמבחר המברגים גדול ומגוון יותר, כך יכול בעל המקצוע לתקן סוגים רבים יותר של תקלות. מנגד, ארגז המכיל שני סוגי מברגים בלבד, יגביל משמעותית את מרחב הפעולה שלו. באופן דומה, המגוון הגנטי מתבטא בקיומם של אללים שונים (גרסאות שונות של אותו גן) בתוך האוכלוסייה. כל גרסה עשויה להעניק יתרון במצב סביבה נתון. ככל שהשונות הזו גבוהה יותר ומתפרסת על פני גנים רבים, כך גדל הסיכוי שבעת שינוי קיצוני בתנאים ימצאו באוכלוסייה פרטים בעלי שילוב גנטי המקנה להם יתרון הישרדותי (איור 1).

מכיוון שהטבע אינו סטטי אלא נתון להפרעות מתמידות, המגוון הגנטי מהווה תשתית חיונית המאפשרת לאוכלוסייה להשתנות, להתחדש ולהסתגל למציאות משתנה במצבים של אי-ודאות (Reed and Frankham, 2003). השילוב הספציפי של גנים ואללים באוכלוסייה נתונה קובע הלכה למעשה את תפקודה האקולוגי (Stange et al., 2021), ומתבטא בתכונות מדידות הנראות כלפי חוץ ונקראות פנוטיפ. מגוון גנטי גבוה מכתוב מנעד רחב לתכונות כגון קצב הצמיחה, מועדי הפריחה או ריכוז תרכובות שניוניות, והן מעצבות את יחסי הגומלין של האורגניזם עם סביבתו.

לדוגמה, עצי הצפצפה (*Populus spp.*) ממחישים היטב כיצד שינויים גנטיים שקובעים את ריכוז הטנינים, שהם חומרי הגנה כימיים נגד מזיקים בעלים, מחוללים השפעת שרשרת אקולוגית: ההבדלים האלה משפיעים ישירות



איור 1

השפעת המגוון הגנטי על חוסן האוכלוסייה ועל אספקת שירותי המערכת האקולוגית

האיור מציג השוואה בין שתי אוכלוסיות של אותו מין, ומדגים כיצד רמת המגוון הגנטי קובעת את יכולת ההתאמה וההישרדות של המערכת כולה אל מול הפרעות חיצוניות. האוכלוסייה השמאלית מאופיינת במאגר גנטי עשיר (סליל ה-DNA הצבעוני). בזכות השונות הגנטית הגבוהה יש לאוכלוסייה ארגז כלים רחב להתמודדות עם שינויים. כאשר מתרחש אירוע עקה, האוכלוסייה מפגינה חוסן גבוה, משתקמת במהירות, ושומרת על רמת תפקוד גבוהה לאורך זמן. האוכלוסייה הימנית מאופיינת במאגר גנטי דל ואחיד (סליל ה-DNA האפור). בשל שונות גנטית נמוכה האוכלוסייה הזו רגישה מאוד לשינויים סביבתיים. בעת אירוע עקה תפקוד האוכלוסייה קורס ואינו מצליח להשתקם, מה שמוביל לאובדן היציבות של המערכת. האיור ממחיש כי המגוון הגנטי הוא התשתית לאספקת שירותי מערכת חיוניים לאדם. האיור נוצר באמצעות שימוש בתוכנת Biorender - <https://BioRender.com>

בריכוז חומרים כימיים או מועדי פריחה, המהווים ביטוי מוחשי למגוון הגנטי המשפיע על המערכת האקולוגית. עם זאת, שימוש בגישה פנוטיפית מצריך מערכת ניסוי לבחינת השונות בתנאים אחידים (common gardens), המאפשרת נטרול שונות שנובעת מפלסטיות פנוטיפית ומתנאי סביבה משתנים. לבסוף, התפתחות הגנומיקה הנופית (landscape genomics) מאפשרת לשלב את הנתונים הגנומיים ברזולוציה גבוהה עם נתונים סביבתיים ומרחביים מורכבים. הגנומיקה הנופית בוחנת כיצד מאפייני הנוף (כגון טופוגרפיה, סוג קרקע או מחסומים גאוגרפיים) ומשתני אקלים משפיעים על פיזור השונות הגנטית במרחב. באמצעות זיהוי קישורים בין גנוטיפ לסביבה (Genotype-Environment Associations – GEA), ניתן למפות את פוטנציאל ההסתגלות של אוכלוסיות ולהבחין בין תהליכים דמוגרפיים אקראיים (כמו סחיפה גנטית ובידוד עקב מרחק) לבין תהליכי ברירה טבעית המביאים להתאמה מקומית. הבנה אינטגרטיבית זו חיונית לחיזוי עמידותן של אוכלוסיות עצים לשינוי האקלים ולגיבוש אסטרטגיות שימור מבוססות נתונים.

הגן שהתקבלו משני ההורים במקביל. יכולת זו מעניקה לחוקרים כלים לזהות בדיוק רב יותר את המבנה הגנטי של האוכלוסייה ולחשוף פרטים מעמיקים על החוסן והעמידה של היער, מידע שלא ניתן להפיק בשיטות המוקדמות והפשוטות יותר. תהליך האפיון הגנטי כולל הפקת DNA מרקמות ביולוגיות (כגון עלים) וריצופו בהיקף נרחב, מה שמאפשר זיהוי וריאנטים גנטיים ברזולוציה גבוהה בין פרטים ואוכלוסיות. באמצעות כלי מחשוב של גנטיקה של אוכלוסיות ניתן לקבוע מדדים מגוונים של מגוון גנטי, כמו עושר אללים והטרוזיגוטיות (צירופי אללים). הכלים האלה מאפשרים לאמוד מרחקים גנטיים בין אוכלוסיות ברזולוציה גבוהה וכן לבצע ניתוחים השוואתיים בין מרחקים גנטיים למרחקים גאוגרפיים. נוסף על כך, ניצול של ריבוי סמנים גנטיים מבוססי שונות ברמת הבסיס הבודד (Single Nucleotide Polymorphism – SNP) מאפשר להבחין בין שונות ניטרלית לבין שונות הסתגלותית, אותם אזורים בגנום המשפיעים ישירות על כושר ההישרדות וההתאמה של הפרט לתנאי הסביבה. לצד המדדים הגנטיים ניתן למדוד שונות גם דרך הפנוטיפ התפקודי, כגון הבדלים

המגוון הגנטי של המינים המעוצים בישראל

בישראל נכששים ארבעה אזורי צומח: הים תיכוני, האירנו-טורני, הסהרו-ערבי והסודני. מרבית שטחי ישראל מוגדרים כ"טריטוריות מורכבות", המאופיינות בערבוב של טיפוסים תפוצה שונים (Danin and Plitmann, 1987). מורכבות זו אינה רק גאוגרפית, אלא מהווה כור היתוך אבולוציוני התורם לתהליכי הסתגלות מקומית ותורם לעושר הגנטי במינים המעוצים. חשיבות מיוחדת לשימור המגוון הגנטי טמונה במובלעות ובשרידי צומח המצויים מחוץ לתחום תפוצתם העיקרי, מה שמכונה אוכלוסיות קצה או אוכלוסיות פריפריות (Kark and Van Rensburg, 2006). דנין ופליטמן (1987) מצביעים על קיומם של אלמנטים ים תיכוניים בסדקי סלעים בלב המדבר ועל מובלעות סודניות בתוך האזור הים תיכוני. האוכלוסיות המבודדות האלה עשויות להכיל מאגרים גנטיים נדירים וייחודיים, המייצגים עמידות לתנאי סביבה קיצוניים או שינויי אקלים היסטוריים. יתרה מכך, ההיסטוריה הארוכה של ההתיישבות האנושית באזור, הכוללת כריתה נרחבת של יערות אלון בשרון או שימוש בעצי שיטה ורותם בתעשיית המתכת העתיקה, יצרה קיטוע משמעותי בבתי הגידול (ויץ, 1970; פרבולוצקי ואח', 2013). בעוד שהאופי הפיטוגאוגרפי הכללי של האזור נשמר, הקיטוע עלול ככל הנראה להוביל לבידוד גנטי באוכלוסיות העצים, ובמקרים מסוימים לגרום לירידה בשונות הגנטית. תרחיש כזה מהווה איום ממשי בהכחדה מקומית של המין (Fady and Conord, 2010). בדו"ח מצב הטבע משנת 2023 צוין כי אוכלוסיות באזור המעבר בין החבל הים תיכוני למדברי מהוות את גבול תפוצת המין, ולכן עשויות להיות בעלות ערך גנטי לשימור (גרסברד ורנן, 2024). עם זאת, לא קיימת בדו"ח התייחסות למגוון הגנטי של צמחי ישראל או של העצים בפרט.

בעשורים האחרונים ראו אור מספר מחקרים שעסקו באפיון המגוון הגנטי של אוכלוסיות עצים טבעיות בישראל. המחקרים הראשונים שפורסמו עשו שימוש בסמנים גנטיים מהדור הישן, ולמרות זאת, הם העמיקו משמעותית את הבנתנו באשר למבנה הגנטי של מספר מיני עצים מקומיים. שלושה מיני אלון (*Quercus*) נחקרו: אלון התבור (*Q. ithaburensis*), אלון התולע (*Q. boissieri*) ואלון מצוי (*Q. coccifera*) (שילר ואח', 2014). המחקרים הראו כי לכל מין דפוסים גנטיים ייחודיים, המושפעים מתנאי הסביבה ומההיסטוריה האבולוציונית שלו. המחקר של אלון התבור חשף כי קיים מתאם מובהק בין המבנה הגנטי של האוכלוסיות לבין תנאים גאוגרפיים ואקלימיים. האוכלוסיות התקבצו לשלוש קבוצות גנטיות התואמות את אזורי התפוצה (רמת הגולן והגליל העליון, הגליל התחתון, מישור החוף). נמצא קשר בין תדירויות אללים

לבין כמות המשקעים וקו הרוחב (Korol et al., 2004). קיטוע האוכלוסיות הוביל לבידוד רבייתי, שבשילוב עם תנאי אקלים מגוונים הניע תהליכי התמיינות והתאמה גנטית מקומית לתנאי הסביבה. נוסף על כך, מספר אוכלוסיות הראו דמיון גנטי לאוכלוסיות מרוחקות גאוגרפית, ממצא המרמז על העברת חומר ריבוי על ידי האדם בעבר. אצל אלון התולע נמצאה שונות גנטית בתוך האוכלוסיות ובין האוכלוסיות. עם זאת, בניגוד לאלון התבור, לא נמצא קשר ברור בין השונות הגנטית ובין המרחק הגאוגרפי או תנאי האקלים של האוכלוסיות (Schiller et al., 2004). עובדה זו מרמזת כי ההבדלים הגנטיים בין האוכלוסיות אינם נובעים מהתאמה לתנאי סביבה שונים, אלא הם תוצר של בידוד רבייתי וסחיפה גנטית אקראית. בדומה לאלון התולע, הרוב המכריע של השונות הגנטית בפרטי אלון מצוי קיים בתוך האוכלוסיות, ורק חלק קטן נובע מהבדלים ביניהן. השונות הגנטית הנמוכה בין האוכלוסיות של אלון מצוי מעידה על מעבר גנים (*gene flow*) גבוה ביותר שמקטין את הסיכוי ליצירת אוכלוסיות נבדלות זו מזו. ייתכן כי מעבר גנים מיטבי נשמר הודות ליכולת ההתחדשות הווגטטיבית מבסיס הגזע לאחר שרפה או כריתה, תכונה שמקנה לאלון המצוי עמידות רבה יותר בפני קיטוע וצמצום גודל האוכלוסייה (Schiller et al., 2006). למרות מעבר גנים משמעותי בין אוכלוסיות האלון המצוי, אוכלוסיות שנמצאות בשולי אזור התפוצה ובתנאי יובש הראו שונות גנטית ייחודית. בולטת במיוחד אוכלוסיית דיר-רזק שבדרום הר חברון, שהציגה את רמת השונות הגנטית הגבוהה ביותר במחקר (מדד Nei לשונות גנטית: $h = 0.355$).

מחקר שנעשה על אלת המסטיק (*Pistacia lentiscus*) בישראל ובקפריסין העלה כי למרות קיומה של שונות גנטית בין שני האזורים, האוכלוסיות בישראל מאופיינות בהומוגניות גנטית גבוהה ובמעבר גנים רציף. החוקרים מצאו פער בין המבנה הגנטי האחד לבין השונות הפנוטיפית המובהקת שנמדדה בשטח (Nahum et al., 2008). פער זה הוביל למסקנה כי השונות הפנוטיפית בין האוכלוסיות אינה נובעת משינוי גנטי, אלא מפלסטיות פנוטיפית. אצל אלת המסטיק הפלסטיות הפנוטיפית, שהיא האסטרטגיה המרכזית של המין, מאפשרת לפרטים בעלי מטען גנטי דומה לשרוד ולשגשג בטווח רחב של בתי גידול, מה שהופך את המין למותאם יותר לשינויי אקלים עתידיים. לצד הממצאים שהתקבלו באמצעות הסמנים מהדור הישן, מחקרים אחרים שפורסמו בשנים האחרונות אימצו את השימוש בסמני SSR ככלי מרכזי. השונות הגנטית באוכלוסיות עצי שיטה סוככנית (*Vachellia tortilis*) נבחנה בישראל ובירדן, המהוות את קצה גבול התפוצה הצפוני של המין. בהשוואה לאוכלוסיות מרוחקות, נמצא כי המגוון הגנטי באזור הזה גבוה מזה שנמדד במצרים, אך נמוך מאוכלוסיית המקור

עם האבקת הרוח ומשטר הרוחות (ממערב למזרח). במחקר אחר (Steinitz et al., 2012) נבחנה השוונות הגנטית בשלוש אוכלוסיות טבעיות של אורן ירושלים (*Pinus halepensis*) בישראל (הר פיתולים, הר סומק והר שפנים). הממצאים הצביעו על הבדלים גנטיים ברורים בין האתרים, אולם בתוך האוכלוסיות הטבעיות נמצא מגוון גנטי נמוך בהשוואה לדור הצעיר המתחדש סביבן. פער זה נובע ממעבר גנים נרחב מחלקות האורנים הנטועות בקרבת מקום. מעבר הגנים מהאוכלוסיות הנטועות מפר את המבנה הגנטי של האוכלוסיות הטבעיות, ומעלה חשש לאובדן תכונות הסתגלות מקומיות. אי לכך, עולה חשיבותו המכרעת של שימור המגוון הגנטי הייחודי.

ממצאי המחקרים במינים שצוינו לעיל מעידים כי השוונות הגנטית באוכלוסיות עצים טבעיות בישראל דינמית ומגוונת, ונעה על פני רצף, מבידוד גנטי מובהק (אלון התבור וזית) ועד הומוגניות ומעבר גנים רציף (אלת המסטיק ואלון מצוי, טבלה 1). ההבדלים האלה משקפים לרוב את השילוב שבין הביולוגיה של המין לבין התנאים האקולוגיים בשטח; למשל, מינים המאופיינים בהאבקת רוח ובהפצת זרעים לטווחים

בסודן. באוכלוסיות ישראל וירדן נמצא קשר חיובי מובהק בין מרחק גאוגרפי למרחק גנטי, המעיד על מבנה אוכלוסייה היררכי. אתר 'רודד' שנמצא באזור אילת הציג את המגוון הגנטי הגבוה ביותר, בעוד שאתר 'שלמה' הסמוך הציג את המדדים הנמוכים ביותר (Rodger et al., 2018). המחקר מדגיש את קיומן של אוכלוסיות ספציפיות המשמשות צמתים מרכזיים ברשת מעבר הגנים, חלק מהן סווגו כמוקדות (hotspots) לשימור המגוון הגנטי ולהמשכיות מעבר הגנים בין האוכלוסיות. במחקר נוסף שנעשה על זית הבר (*Olea europaea* subsp. *europaea* var. *sylvestris*) באזור רכס הכורכר בעתלית, נמצא כי האוכלוסייה נבדלת גנטית באופן מובהק מאוכלוסיות הזית התרבותי הגדלות באזור (Ben-Dor et al., 2024). הממצאים העלו כי השוונות הגנטית באוכלוסיית הבר גבוהה משמעותית מזו של זני התרבות, עובדה המעידה על קיומו של מאגר גנטי עשיר וחיוני, השונה מהותית מהמטען הגנטי המצומצם והאחיד של זני המטעים. הישרדותה של זהות גנטית מקורית זו חרף אלפי שנים של חקלאות זיתים אינטנסיבית באזור נחשבת לממצא יוצא דופן. החוקרים מייחסים את השימור הגנטי הזה לבידוד הטופוגרפי שנוצר הודות לרכס הכורכר, בשילוב

שם המין	שוונות גנטית (ממצאים מרכזיים)	אסטרטגיה אבולוציונית / הסתגלותית	המלצות לשימור
אלון התבור	קיימת שוונות מובהקת בין שלוש קבוצות גאוגרפיות (צפון, מרכז ודרום). קשר בין תדירות אללים למשקעים ולרוחב רוחב	התאמה מקומית: קיטוע הוביל לבידוד רבייתי ולהתמיינות גנטית בהתאם לתנאי האקלים המקומיים	שימור אוכלוסיות המייצגות את כלל אזורי התפוצה בשל ההבדלים הגנטיים המהותיים ביניהן
אלון התולע	קיימת שוונות בתוך האוכלוסיות וביניהן, אך ללא קשר ברור למרחק גאוגרפי או אקלים	סחיפה גנטית אקראית: ההבדלים הגנטיים נובעים מבידוד רבייתי ומסחר אקראי ולא מהתאמה סביבתית	הגנה על אוכלוסיות מבודדות למניעת אובדן שוונות עקב סחיפה גנטית
אלון מצוי	שוונות נמוכה בין אוכלוסיות והומוגניות גבוהה עקב מעבר גנים רציף. שוונות ייחודית באוכלוסיות קצה (כמו דיר-רזק)	חוסן לקיטוע: יכולת התחדשות וגנטיבית שומרת על מעבר גנים ומקטינה את הסיכון להכחדה מקומית	מתן חשיבות מיוחדת לאוכלוסיות בשולי אזור התפוצה בעלות שוונות גנטית ייחודית
שיטה סוככנית	מגוון גבוה ממצרים אך נמוך מסודן. קשר חיובי בין מרחק גאוגרפי לגנטי	מבנה היררכי: קיום צמתים מרכזיים ומוקדות (hotspots) להמשכיות מעבר הגנים	שימור מוקדות (כמו אתר 'רודד') המשמשות צמתים קריטיים לרשת מעבר הגנים
אלת המסטיק	הומוגניות גנטית גבוהה ומעבר גנים רציף בין ישראל לקפריסין	פלסטיות פנוטיפית: אסטרטגיה המאפשרת לפרטים דומים גנטית לשגשג במגוון בתי גידול ולהיות מותאמים לשינויי אקלים	שימור המין ככלל, שכן הפלסטיות שלו מקנה לו התאמה רבה בפני שינויים עתידיים בתנאי הסביבה ועמידות למזיקים ולמחלות
זית אירופי (זית בר)	שוונות גבוהה משמעותית מזני התרבות וזהות גנטית נבדלת	בידוד טופוגרפי: שימור הזהות המקורית בזכות מחסומים פיזיים (רכס הכורכר) ומשטר רוחות	הגנה על מאגרי גנים של אוכלוסיות בר מקוריות ומניעת ערבוב עם זני מטעים
אורן ירושלים	מגוון גנטי נמוך באוכלוסיות טבעיות בהשוואה לדור הצעיר סביבן	פגיעות לזיהום גנטי: מעבר גנים נרחב מאורנים נטועים משנה את המבנה הטבעי	מניעת זיהום גנטי ממקורות נטועים כדי להגן על תכונות ההסתגלות המקומיות

טבלה 1

מאפייני המגוון הגנטי והמלצות לניהול שימור באתר עבור מיני עצים נבחרים בישראל

באקולוסיות מצומצמות וקטועות, הסובלות מבידוד גנטי ומגודל אוכלוסייה אפקטיבי נמוך, מה שמעלה את רגישותן לקריסה ביולוגית. מצב זה מחייב פעולות שימור אקטיביות, ניטור קפדני ושיקום בתי גידול במטרה למנוע את אובדן המינים האלה מהנוף המקומי.

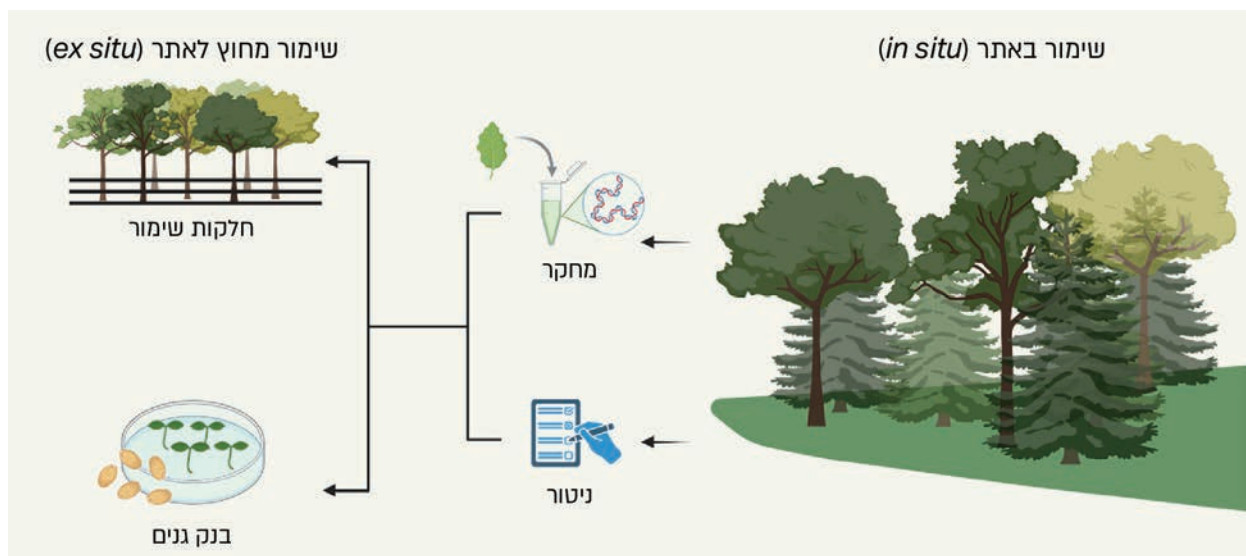
לנוכח הצורך הדחוף בשימור החוסן הביולוגי של כלל המערכות האקולוגיות, מציגה אמנת קונמינג-מונטריאול אסטרטגיות ניהול מבוססות מדע לשמירה על המשאבים הגנטיים (Hoban et al., 2025). פעולות השימור המומלצות בחלוקה לסעיפים אופרטיביים כוללות: (1) שימור בתי גידול באתר (*in situ*): מתן עדיפות להגנה על אזורים המוגדרים כמוקדות של מגוון גנטי, ושימוש בשיעור ההגנה על טווח התפוצה כאינדיקטור לשימור פוטנציאל ההסתגלות של המין במקרים של היעדר מידע גנטי; (2) ניהול איומים דמוגרפיים: נקיטת פעולות לצמצום גורמי סיכון במטרה לשמור על אוכלוסיות גדולות ויציבות, המונעות שחיקה גנטית ורביית קרובים; (3) שיקום קישוריות גנטית: הסרת מחסומים פיזיים ויצירת מסדרונות אקולוגיים המאפשרים מעבר גנים חופשי בין אוכלוסיות מבודדות, דבר המגדיל את החוסן האבולוציוני של המין; (4) ביצוע התקנות (translocations) והצלה גנטית: העברה מבוקרת של פרטים בין אוכלוסיות (genetic rescue) כדי להעשיר את המגוון הגנטי, תוך בחירה מושכלת של מקורות גנטיים המתאימים לתנאי האקלים העתידיים; (5) שימור מחוץ לאתר (*ex situ*): שימור זרעים בבנקי גנים או הקמת תוכניות הכלאה מבוקרות עבור מינים בסכנת הכחדה מיידית (במקרים של אוכלוסיות קטנות מדי או לא פוריות), תוך שימוש בכלים גנומיים מתקדמים לניהול זיווגים ולמזעור אובדן המגוון הגנטי; (6) ניטור ומדידה: הצבת יעדים כמותיים מוגדרים מראש וביצוע ניטור גנטי ארוך טווח כדי להעריך את אפקטיביות פעולות הניהול לאורך דורות; (7) שיתוף פעולה בין-מגזרי: הידוק הקשר בין חוקרים לבין מנהלי שטח לצורך תכנון משותף והכשרה מקצועית.

לאור זאת ובהתאם לעושר המינים באזורנו, על מדינות אגן הים התיכון מוטלת אחריות קולקטיבית לקדם מדיניות שימור שמבוססת על קריטריונים ועל סדרי עדיפויות מוגדרים (Fady et al., 2025). אג'נדת המחקר ליערות הים התיכון 2030 (Bou Dagher Kharrat et al., 2022) מציבה את ניהול המשאבים הגנטיים כעוגן מרכזי, תוך דגש על הקמת רשת של יחידות שימור גנטי (Genetic Conservation Units – GCU). היחידות האלה מאפשרות שימור באתר של אוכלוסיות בעלות פוטנציאל הסתגלותי גבוה, בייחוד באזורי קצה גאוגרפיים, כמו ישראל. שילוב בין תיעוד גנטי מדויק לבין פעולות שימור אקטיביות באתר ומחוץ לאתר חיוני לא רק להגנה על המגוון הביולוגי, אלא גם להמשכיות השירותים המערכתיים שהיערות מספקים

ארוכים על ידי בעלי כנף, נוטים לשמור על קישוריות גנטית גבוהה, בעוד שמינים הגדלים בבתי גידול מקוטעים או מינים שיחידות הריבוי שלהם כבדות ומופצות למרחקים קצרים בלבד, נוטים להראות מבנה גנטי מבודד יותר. אף שבישראל קיימים כ-70 מיני עצים מקומיים, שרבים מהם מהווים אוכלוסיות קצה של ארבעת אזורי הצמחייה שהוזכרו לעיל, הידע הגנטי הקיים מוגבל למספר מצומצם של מינים. עם זאת, התפתחותם של כלים גנומיים מתקדמים מאפשרת כיום להעמיק את המחקר גם לגבי מינים שאינם מיני מודל, ולהרחיב את בסיס הידע לכלל המינים. צעד משמעותי בכיוון הזה נעשה לאחרונה עם הקמת המרכז הישראלי לשימור ולאכיון של המגוון הביולוגי – IBCC (Israeli Biodiversity Curation Center) במימון הות"ת, שמשתתפים בו מספר מוסדות מחקר במטרה להקים מאגר מידע רב-שכבתי למגוון המינים בישראל (<https://ibcc.co.il>). הכללתם של מספר מיני עצים בתוכנית מהווה תשתית ראשונית לבניית מאגר גנטי מקיף לצומח המעוצה בישראל, ויש לקוות כי היוזמה תסלול את הדרך למיפוי גנטי מלא של כלל המינים המעוצים בישראל.

אסטרטגיות לניהול ושימור המשאבים הגנטיים

אזור אגן הים התיכון מוכר כאחד ממוקדות המגוון הביולוגי (biodiversity hotspots) המובילות בעולם הודות לעושר המינים ולשיעור האנדמיות הגבוהים המאפיינים אותו (Myers et al., 2000). ישנם 643 טקסונים של עצים (מינים ותתי-מינים), מתוכם 262 אנדמיים לאחת מיבשות האגן בלבד, בעוד ש-58 טקסונים נוספים אנדמיים לאזור האגן, אך תפוצתם משתרעת על כני יותר מיבשת אחת (Fady et al., 2025). הנתונים האלה מבססים את מעמדו של אגן הים התיכון כנכס אסטרטגי לשימור ברמה העולמית. עם זאת, ניתוח מצב השימור של עצי האזור מעלה תמונה מדאיגה. על פי הגדרות ה-IUCN, כ-9% ממיני העצים מאוימים. חוקרים מעריכים כי זו הערכת חסר, שכן עבור כמעט ממצחית המינים באגן (46.9%) לא קיים מידע (Fady et al., 2025). לנוכח העובדה שרבים מהמינים שטרם הוערכו הם אנדמיים, קיים חשש ממשי ששיעור המינים המצויים בפועל בסכנת הכחדה גבוה באופן משמעותי מהמדווח. ברמה המקומית הנתונים האלה מקבלים משנה תוקף בפורטל הערכות הסיכון לטבע בישראל ("הספר האדום"). ברשימת המינים האדומים (בסכנת הכחדה או בסיכון) נכללים מספר מיני עצים, דוגמת שקד רמון (*Amygdalus ramonensis*), חוזר החורש (*Eriolobus trilobatus*), אלון שסוע (*Q. cerris*), ערער ארזי (*Juniperus deltoides*), ערער ברושי (*J. excelsa*) ופיקוס בת-שקמה (*Ficus palmata*) (שמידע ואח', 2026). במרבית המקרים מדובר



איור 2

סכמה לניהול משולב של שימור גנטי בעצי יער

קיימת סינרגיה (אגבזר) בין אסטרטגיות שימור שונות להבטחת החוסן האבולוציוני של המין. מימין: שימור באתר (*in situ*) בסביבה הטבעית, המאפשר לכוחות אבולוציוניים (ברירה טבעית, מעבר גנים ומוטציות) להמשיך לפעול, ותומך בהתאמה מקומית לתנאי סביבה משתנים. הפעולות הנגזרות מהיחידות האלה כוללות מחקר גנטי לאפיון פוטנציאל ההסתגלות וניטור רציף של מדדי השונות הגנטית לזיהוי אוכלוסיות בסיכון. משמאל: שימור מחוץ לאתר (*ex situ*) המהווה גיבוי אסטרטגי ושיקום. השימור כולל חלקות שימור ומטעי אם לזרעים ובנקי גנים המספקים שימור סטטי. האיור נוצר באמצעות שימוש בתוכנת Biorender - <https://BioRender.com>.

העצים, כגון מיני שקד ואלון, לא ניתן לשמור זרעים לטווח ארוך. בניגוד לשיטות הדינמיות, בשימור סטטי החומר הגנטי נשמר במצב "מוקפא", ואינו עובר תהליכי התפתחות או הסתגלות אבולוציונית בזמן האחסון (איור 2).

לסיכום, שימור המגוון הגנטי של עצי ישראל הוא הכרח אסטרטגי לנוכח משבר האקלים, בייחוד לאור העובדה שרבים מהמינים המקומיים נמצאים בקצה גבול תפוצתם ונושאים מטען גנטי ייחודי של התאמה ליובש. כדי להבטיח את חוסן היערות אין להסתפק עוד בניטור עושר המינים בלבד, אלא יש להטמיע כלים גנומיים מתקדמים למדידה מדויקת של השונות הגנטית בתוך האוכלוסיות. שימוש במדדים האלה יאפשר זיהוי מוקדי סיכון, מניעת שחיקה גנטית וניהול מושכל של יחידות שימור במטרה להבטיח את המשכיות שירותי המערכת האקולוגית שהטבע מספק, לדורות הבאים.

תודות

אנו מודים למעניקי המלגות לסטודנטית נטשה קינג: מלגת מוסמך במסגרת תוכנית המלגות המשותפת למכון וולקני ולפקולטה לחקלאות ע"ש רוברט ה. סמית, ומלגת Appleby Canada.

לאנושות. מסמך MFRA 2030 מציע מפת דרכים אסטרטגית להתמודדות עם איומי משבר האקלים המחריפים, תוך הצבת המשאבים הגנטיים כעוגן מרכזי לעמידות העתידית של היערות. המסמך מדגיש כי המגוון הגנטי הייחודי של מיני העצים באזור הים התיכון הוא המפתח ליכולת ההסתגלות שלהם לתנאי יובש קיצוניים ולעמידות בפני מזיקים חדשים. לפיכך, יש לתת עדיפות למחקר ולפעולות שימור וניהול של המשאבים האלה באתר ומחוץ לו במטרה להבטיח את המשכיות שירותי המערכת האקולוגית החיוניים שהיערות מספקים (Bou Dagher Kharrat et al., 2022).

בפעולות השימור, הגישה המועדפת והמרכזית היא שימור באתר, המתבצעת בסביבה הטבעית של המין ומאפשרת לכוחות אבולוציוניים, כמו ברירה טבעית, מוטציות ומעבר גנים, להמשיך לפעול, ובכך תומכת ביכולת ההסתגלות המקומית של האוכלוסייה לשינויי סביבה (איור 2). בשימור מחוץ לאתר אוכלוסיות או מינים מועברים וניטעים מחוץ לבית גידולם המקורי או מחוץ לטווח התפוצה הטבעי שלהם (למשל, במטעי זרעים או בחלקות שימור ייעודיות). למרות השינוי במיקום התהליכים האבולוציוניים עדיין מתרחשים בשטח שהעצים ניטעו בו. במקרים מסוימים שימור מחוץ לאתר יכול להיות גם סטטי ולכלול אחסון לטווח ארוך של חומר גנטי, כגון זרעים, אבקה או רקמות צמחיות, בתוך בנקי גנים (Barazani et al., 2008). חשוב לציין כי ברבים ממיני

- Hébert K, Pollock L, and Hoban S. 2025. How much monitoring is needed to reliably track progress towards genetic diversity targets? *EcoEvoRxiv*. <https://doi.org/10.32942/X2F35K>.
- Hoban S, Hvilsom C, Aissi A, Aleixo A, Bélanger J, Biala K, et al. 2025. How can biodiversity strategy and action plans incorporate genetic diversity and align with global commitments? *BioScience*, 75(1), 47–60.
- Kark S and Van Rensburg BJ. 2006. Ecotones: Marginal or central areas of transition? *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 52, 29–53.
- Korol L, Shklar G, and Schiller G. 2004. Tabor oak in Israel, genetic diversity within and between populations. *Forest Genetics*, 11(3–4), 317–323.
- Manes F, Blasi C, Salvatori E, Capotorti G, Galante G, Feoli E, et al. 2012. Natural vegetation and ecosystem services related to air quality improvement: Tropospheric ozone removal by evergreen and deciduous forests in Latium (Italy). *Annali Di Botanica*, 2, 79–86.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Da Fonseca GAB, and Kent J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*. 403, 853–858.
- Nahum S, Inbar M, Ne'eman G, and Ben-Shlomo R. 2008. Phenotypic plasticity and gene diversity in *Pistacia lentiscus* L. along environmental gradients in Israel. *Tree Genetics and Genomes*, 4(4), 777–785.
- Noss RF. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: A hierarchical approach. *Conservation Biology*, 4, 355–364.
- Reed DH and Frankham R. 2003. Correlation between fitness and genetic diversity. *Conservation Biology*, 17(1), 230–237.
- Rodger YS, Greenbaum G, Silver M, Bar-David S, and Winters G. 2018. Detecting hierarchical levels of connectivity in a population of *Acacia tortilis* at the northern edge of the species' global distribution: Combining classical population genetics and network analyses. *Plos One*, 13(4), 1–16.
- Schiller G, Shklar G, and Korol L. 2004. Genetic diversity assessment by random amplified polymorphic DNA of oaks in Israel. 2. *Quercus boissieri* Reut. *Israel Journal of Plant Sciences*, 52, 315–322.
- Schiller G, Shklar G, Ungar ED, Al-Omari A, Zyadin F, and Korol L. 2006. Genetic diversity assessment by random amplified polymorphic DNA of oaks: 3. *Quercus calliprinos* Webb. in Israel and Jordan. *Israel Journal of Plant Sciences*, 54, 137–148.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2011. *Convention on Biological Diversity: Text and Annexes*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Quebec, Canada.
- Shachak M, Bertrand B, Groner E, Kadmon R, Lubin Y, Meron E, et al. 2008. Woody species as landscape modulators and their effect on biodiversity patterns. *BioScience*, 58(3), 209–221.
- Shaw RE, Farquharson KA, Bruford MW, Coates DJ, Elliott CP, Mergeay J, et al. 2025. Global meta-analysis shows action is needed to halt genetic diversity loss. *Nature*, 638(8051), 704–710.
- Singer A, Fried M, and Shamay Y. 1996. Throughfall deposition of sulfur to a mixed oak and pine forest in Israel. *Atmospheric Environment*, 30, 3881–3889.
- Stange M, Barrett RDH, and Hendry AP. 2021. The importance of genomic variation for biodiversity, ecosystems and people. *Nature Reviews*, 22, 89–105.
- Steinitz O, Robledo-Arnuncio JJ, and Nathan R. 2012. Effects of forest plantations on the genetic composition of conspecific native Aleppo pine populations. *Molecular Ecology*, 21(2), 300–313.
- Stephens T. 2023. The Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework. *International Legal Materials*, 62(5), 868–887.
- גרוסברד ש ורנן א (עורכים). 2024. **דו"ח מצב הטבע 2023 – כרך המגוון הביולוגי**. המארג – התכנית הלאומית להערכת מצב הטבע. מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.
- ויץ י. 1970. **היער והייעור בישראל**. עמ' 37–46. רמת גן: מסדה.
- לוטן א, גרוסברד ש, ספריאל א' וכייטלסון ע (עורכים). 2019. **מערכות אקולוגיות ורווחת האדם – הערכה לאומית, דו"ח ממצאי מפתח**. המארג – התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.
- פרבולוצקי א, רוזן ב ורוזנברג ד. 2013. האדם כמהנדס-על אקולוגי בחורש הים תיכוני. בתוך: פרבולוצקי א (עורך). **משק ושימור האקוסיסטמה הים תיכונית: רמת הנדיב כמשל**. זכרון יעקב: הוצאת רמת הנדיב.
- שילר ג, שקלר ג וקורול ל. 2014. הכרת המגוון הגנטי של מיני האלוניים הגדלים בארץ – בסיס להצלחה בנטיעות. **אקולוגיה וסביבה**, 2(2), 181–188.
- שמידע א, פולק ג ופרגמן-ספיר א. 2026. **פורטל הערכות הסיכון לטבע בישראל: צמחים בסכנת הכחדה**. רשות הטבע והגנים. <https://redlist.parks.org.il/plants>
- שפיר ש, ברקוביץ ע, ספריאל א, וויץ י (עורכים). 2018. המערכות האקולוגיות של החבל הים תיכוני – הפרק המלא. בתוך: **מערכות אקולוגיות ורווחת האדם – הפרקים המלאים**. 2021. המארג – התכנית הלאומית להערכת מצב הטבע, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.
- Bailey JK, Schweitzer JA, Rehill BJ, Lindroth RL, Martinsen GD, and Whitham TG. 2004. Beavers as molecular geneticists: A genetic basis to the foraging of an ecosystem engineer. *Ecology*, 85(3), 603–608.
- Barazani O, Perevolotsky A, and Hadas R. 2008. A problem of the rich: Prioritizing local plant genetic resources for ex situ conservation in Israel. *Biological Conservation*, 141(2), 596–600.
- Ben-Dor E, Dag A, Perelberg A, Chen T, Ben Dor Y, Low Ramati D, et al. 2024. Genetic and phenotypic evidence suggest the existence of indigenous olive population of wild var. *sylvestris* in the Carmel coast, southern Levant. *BMC Plant Biology*, 24(1), 1–13.
- Bou Dagher Kharrat M, Martinez de Arano I, Zeki-Başken E, Feder S, Adams S, Briers S, et al. 2022. *Mediterranean Forest Research Agenda 2030*. Joensuu, Finland: European Forest Institute.
- Chapin FS III, Vitousek PM, and Matson PA. 2011. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, 2nd ed. Springer.
- Da Silva JM, Bertola LD, Dewoody JA, Steeves T, Sunnucks P, Vilaça ST, et al. 2026. Conserving genetic and genomic diversity in accordance with global biodiversity framework. *Annual Review of Animal Biosciences*, 14, 9.1–9.30.
- Danin A and Plitmann U. 1987. Revision of the plant geographical territories of Israel and Sinai. *Plant Systematics and Evolution*, 156, 43–53.
- Ding X, Reich PB, Hisano M, and Chen HYH. 2024. Long-term stability of productivity increases with tree diversity in Canadian forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(49), 1–9.
- Fady B and Conord C. 2010. Macroecological patterns of species and genetic diversity in vascular plants of the Mediterranean basin. *Diversity and Distributions*, 16(1), 53–64.
- Fady B, Farsakoglou AM, Caron M, Abulaila K, Aleksic J, Alipour S, et al. 2025. Native trees of the Mediterranean region: Distribution, diversity and conservation challenges. *Current Forestry Reports*, 11(1), 1–20.
- Frankham R, Bradshaw CJA, and Brook BW. 2014. Genetics in conservation management: Revised recommendations for the 50/500 rules, Red List criteria and population viability analyses. *Biological Conservation*, 170, 56–63.
- Gamfeldt L, Snäll T, Bagchi R, Jonsson M, Gustafsson L, Kjellander P, et al. 2013. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications*, 4, 1–8.